

## ИЗМЕРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОСТИ

*В.А.Гайский, А.В.Клименко,  
А.Н.Греков, Д.М.Васильев*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

*Дается описание измерителя электропроводности жидкости на базе четырехэлектродного датчика, питаемого знакопеременным током.*

Широко применяются измерители электропроводности жидкости, содержащие четырехэлектродные датчики, включенные в схемы вторичных измерительных преобразователей с питанием датчиков по токовым электродам постоянным или переменным током и съемом информативного сигнала с потенциальных электродов [1].

Общим недостатком всех этих устройств, в которых напряжение (постоянное или переменное) с потенциальных электродов прямо используется далее для определения электропроводности жидкости, является обратная функциональная зависимость результата измерения от проводимости жидкости, что приводит к потере чувствительности измерителя при больших проводимостях, например, характерных для морской воды.

Целесообразно построить измеритель, в котором аналоговый сигнал, преобразуемый в код, был бы прямо пропорционален проводимости жидкости.

Структурная схема такого измерителя представлена на рисунке 1.

Измеритель содержит четырехэлектродный датчик 1 с токовыми ТТ и потенциальными ПП электродами, четырехплечий мостовой коммутатор (К-1) 2 направления тока через датчик с ключами  $2_1, 2_2, 2_3$  и  $2_4$  в плечах, генератор тока ГТ-1 3, выход которого соединен с первой вершиной первой диагонали коммутатора 2, вторая вершина которой через образцовый резистор заземлена, а токовые электроды ТТ датчика 1 соединены с вершинами второй диагонали мостового коммутатора (К-1) 2. Резистор 4 служит для контроля генератора тока 2.

Потенциальные электроды ПП датчика 1 поданы на вершины первой диагонали второго четырехплечевого мостового коммутатора (К-2) 5, вершины второй диагонали которого соединены со входами инструментального усилителя (ИУ) 6, выход которого подан на первый вход операционного усилителя (ОУ) 3<sub>1</sub> в генераторе тока ГТ-1 3, второй вход которого соединен с источником опорного напряжения 3<sub>2</sub>, а выход подан на затвор (базу) транзистора 3<sub>3</sub>, сток (коллектор) которого через нагрузочный резистор 3<sub>4</sub> соединен с выходом источника постоянного напряжения (ИПН) 7 и подан на вход второго генератора тока (ГТ-2) 8, токовый выход которого через образцовый резистор 9 соединен с землей. Вторым генератором тока (ГТ-2) 8 образован операционным усилителем (ОУ) 8<sub>1</sub>, выход которого подан на базу транзистора 8<sub>2</sub>, эмиттер которого соединен со вторым входом операционного усилителя непосредственно и через нагрузочный резистор 8<sub>3</sub> с выходом источника постоянного напряжения (ИПН) 7.

Вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 10 соединен с незаземленным выводом резистора 9. Выходы управления микроконтроллера 11 поданы на входы управления коммутаторов 2 и 5 и АЦП 10.

Генератор тока ГТ-1 служит для формирования тока через датчик электропроводности 1, пропорционального проводимости жидкости.

Для этого напряжение обратной связи снимается с потенциальных электродов ПП и поступает через коммутатор (К-2) и инструментальный усилитель 6 на регулирующий вход генератора тока (ОУ) 3<sub>1</sub>.

Коммутатор 2 служит для изменения направления тока через токовые электроды ТТ датчика, а коммутатор 5 предназначен для синфазного с коммутатором 2 изменения полярности напряжения, снимаемого с потенциальных электродов ПП датчика 1.

Генератор тока 8 служит для съема и привязки к земле уровня напряжения, пропорционального проводимости жидкости, перед аналого-цифровым преобразованием.

Для управления коммутаторами и АЦП служит микроконтроллер 11.

На входе инструментального усилителя 6 может быть включен фильтр нижних частот.

Измеритель работает следующим образом.

Датчик электропроводности 1 помещен в жидкость. Управляющим сигналом от микроконтроллера 11 ключи  $2_1$  и  $2_2$  коммутатора 2 и ключи  $5_1$  и  $5_2$  коммутатора замкнуты, а ключи  $2_3, 2_4, 5_3$  и  $5_4$  разомкнуты.

Через транзистор  $3_3$ , ключ  $2_1$ , токовые электроды ПП датчика 1 и жидкость, ключ  $2_2$  протекает ток  $I$ .

На потенциальных электродах ПП датчика 1 возникает постоянное напряжение

$$U_{пп} = IG_x^{-1}, \quad (1)$$

где  $G_x$  — электропроводность участка жидкости между потенциальными электродами.

Напряжение  $U_{пп}$  через замкнутые ключи  $5_1$  и  $5_2$  поступает на вход инструментального усилителя 6, усиливается в "К" раз и подается на вычитающий вход операционного усилителя  $3_1$  для сравнения с опорным напряжением  $U_{он}$ . Сигнал разбаланса поступает с выхода операционного усилителя  $3_1$  на затвор (базу) транзистора  $3_3$  и в его цепи автоматически устанавливается ток  $I$ , при котором выполняются равенство

$$KU_{пп} = U_{он}, \quad (2)$$

поскольку  $KIG_x^{-1} = U_{он}$ , то

$$I = \frac{U_{он}}{K} G_x. \quad (3)$$

При этом напряжение на резисторе  $3_4$  будет,

$$U_2 = IR_{3_4} = \frac{U_{он}}{K} R_{3_4} G_x \quad (4)$$

ток через резисторы  $8_3$  и  $9$  будет

$$I_1 = \frac{U_2}{R_{8_3}} = \frac{U_{он}}{K} \frac{R_{3_4}}{R_{8_3}} G_x, \quad (5)$$

напряжение на резисторе  $9$  и входе АЦП  $10$

$$U_x = I_1 R_9 = \frac{U_{он}}{K} \frac{R_{3_4}}{R_{8_3}} G_x R_9, \quad (6)$$

или

$$G_x = const U_x, \quad (7)$$

где  $const = \frac{KR_{8_3}}{U_{он} R_{3_4} R_9}$  — постоянная, за-

висающая от параметров схемы.

Далее в следующем такте сигналом от микроконтроллера 11 ключи  $2_1, 2_2, 5_1, 5_2$  размыкаются, а ключи  $2_3, 2_4, 5_3, 5_4$  замыкаются. При этом направление постоянного тока через токовые электроды ТГ датчика изменяется на противоположное и полярность напряжения на  $U_{пп}$  потенциальных электродах изменяется на противоположную. Однако на входе инструментального усилителя 6 полярность напряжения не изменяется и далее генератор тока 3 работает также, как и в первом такте. Фактически в режиме разнополярного тока работает датчик электропроводности 1 и два его коммутатора 2 и 5.

Если бы эквивалентной электрической схемой датчика была бы только активная проводимость, то в цепи датчика отсутствовали бы переходные процессы и через датчик проходил бы ток типа "меандр", а через генератор тока 3 — постоянный ток.

В действительности же датчик электропроводности представляется сложной эквивалентной электрической схемой, параметры которой изменяются в рабочем диапазоне электропроводности.

Выбор частоты коммуникации и момента времени съема или времени интегрирования при съеме  $U_x$  зависят от характеристик конкретного датчика.

Для примера на рисунке 2 представлена эквивалентная схема датчика электропроводности на переменном токе СТД-измерителя уровня моря.

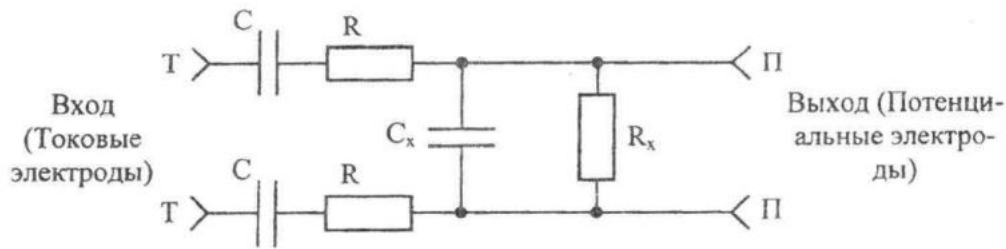


Рис. 2 – Упрощенная эквивалентная схема датчика электрической проводимости  
 $C$  – эквивалентная емкость двойного слоя “электрод–раствор”;  $R$  – эквивалентное сопротивление между токовыми и потенциальными электродами;  $R_x$  – сопротивление между потенциальными электродами;  
 $C_x$  – емкость между потенциальными электродами.

В реальной схеме измерителя использовались следующие микросхемы: коммутаторы (К-1) и (К-1) – 561КТ3, ИОН  $3_2$  – REF-104, ОУ  $3_1$  – ОРА 137, транзистор  $8_2$  – КТ 361, АЦП 10 и МК-11 – ADuC 824.

Для моделирования схемы был выбран пакет Electronics Workbench (EWB) [3] из-за возможности пополнения баз компонентов новыми посредством изменения их параметров и программирования в языках X-Spice, Verilog, V+DL, а также возможности непосредственного изменения параметров цепи в процессе симуляции и наблюдения реакции схемы. В пакете EWB не было ОРА 137 и INA 111, поэтому Spice-модели этих микросхем были взяты с сайтов производителей и загружены в пакет.

Для моделирования в одной точке диапазона измерения были взяты следующие параметры эквивалентной схемы датчика электропроводности:  $C = 238 \text{ nF}$ ,  $R = 107 \text{ Ом}$ ,  $C_x = 170 \text{ nF}$ ,  $R_x = 358 \text{ Ом}$ .

На рисунке 3 представлены осциллограммы напряжений на токовых электродах  $U_{ТТ}$ , на потенциальных электродах  $U_{ПП}$ , на входе инструментального усилителя  $U_{ИУ}$  и на входе АЦП  $U_x$ , соответствующие реальной схеме и машинной модели (пунктир) на частоте 5 КГц.

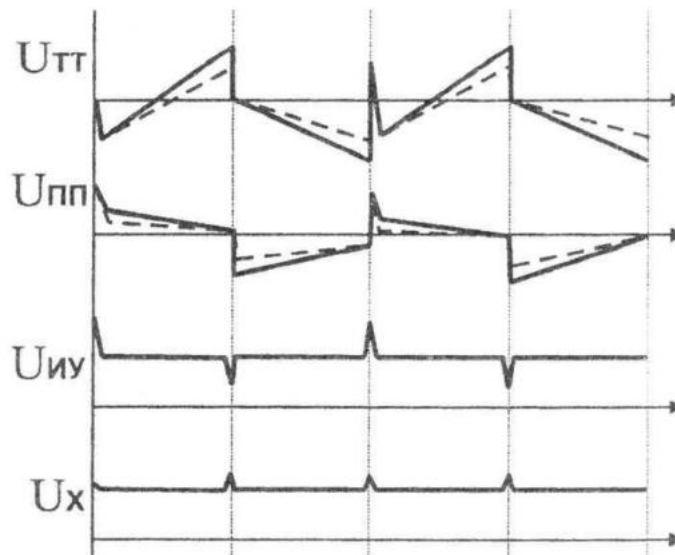


Рис. 3 – Осциллограммы напряжений в узлах схемы измерителя реального и модели (пунктир)

На рисунке 4 представлена градуировочная характеристика реального измерителя, аппроксимируемая полиномом

$$S_x = -0,1202 - 1,56805 \cdot 10^{-2} U + 2,3171 \cdot 10^{-6} \cdot U^2 \quad (8)$$

с максимальной относительной погрешностью 0,3% в диапазоне соленостей  $S$  морской воды от 0 до 18‰, характерном для вод Черного моря.

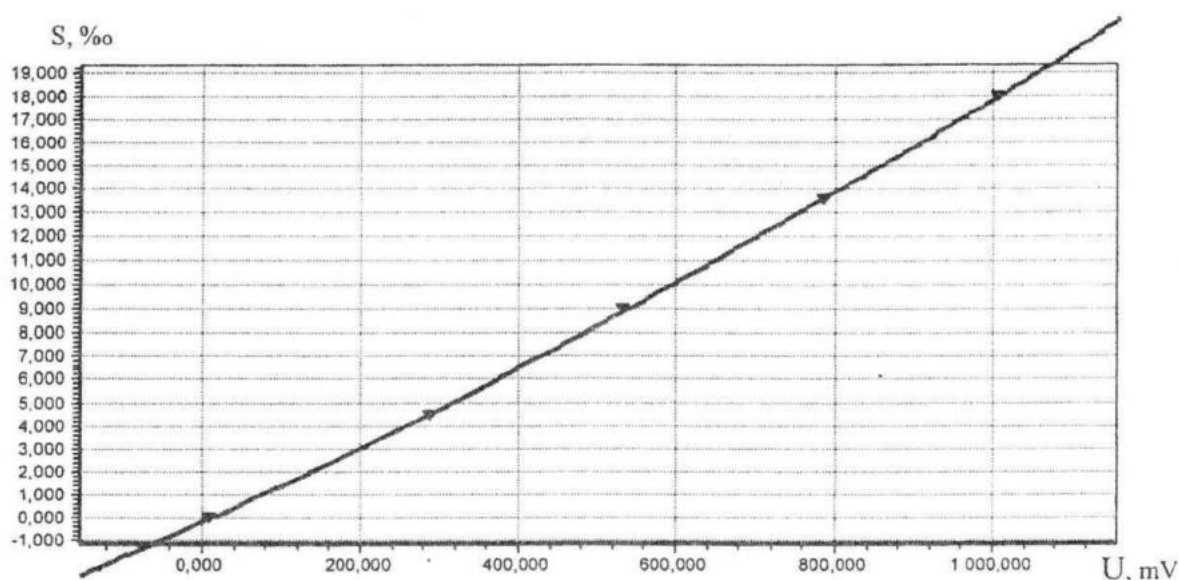


Рис. 4 — Градуировочная характеристика по солености при нормальных условиях

Уровень инструментальных шумов измерителя составляет не более  $3 \cdot 10^{-6}$ . Это свидетельствует о его потенциальных метрологических возможностях при установке другого датчика.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанюк И.А. Океанологические измерительные преобразователи. — М.: Гидрометиздат. — 270 с.

2. Б.А. Лопатин. Кондуктометрия. Редакционно-издательский отдел Сибирского отделения АН СССР. Новосибирск, 1964. — 280 с.

3. В.Д. Радович. Система сквозного проектирования электронных устройств. Design Lab 8.0. Изд-во "Солон". — М.: 1999. — 698 с.